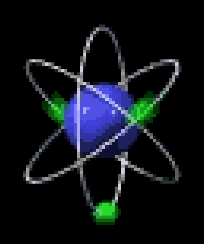


RADIOPROTECTION

HSE 2006-2007

module 3.2.2 « risque radiologique »

Radioprotection
définition

- Ensemble des mesures prises pour protéger

    les travailleurs

    la population

    les écosystèmes

  des dangers des rayonnements ionisants ………..

  tout en permettant leur utilisation .

- Compétence des radiobiologistes , radiotoxicologues médecins qualifiés , radiopathologistes , hygiénistes

Rayonnement ionisant (RI)

Tout rayonnement - particules ou photons - dont l 'énergie est supérieure à l 'énergie de liaison des électrons les moins liés des atomes constituant la matière vivante - C , H , O , N

$$E_{RI} \geq 12{,}4 \text{ eV}$$

Classification des rayonnements selon leurs effets sur la matière vivante

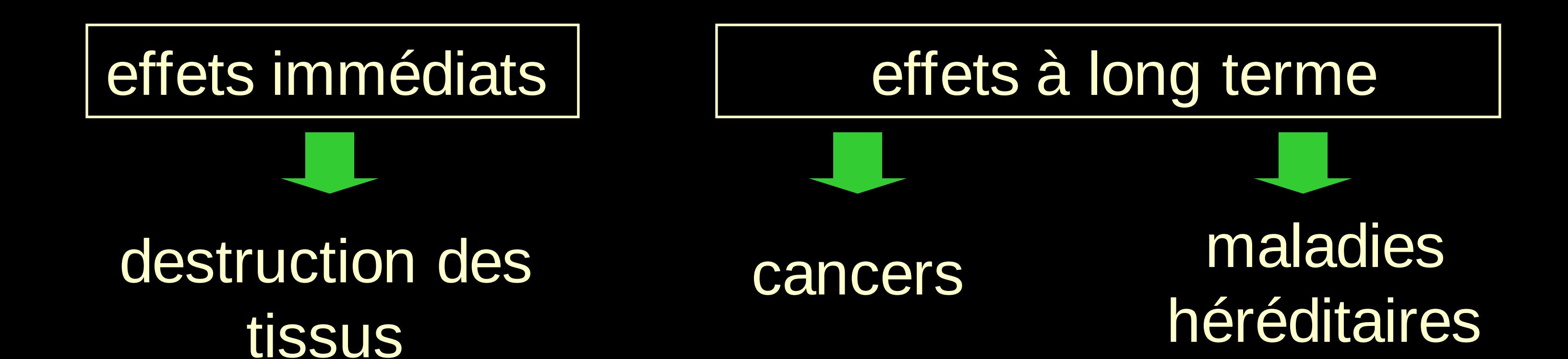
<table>
<tr><td colspan="5">rayonnements</td></tr>
<tr><td>non ionisants</td><td colspan="4">ionisants</td></tr>
<tr><td rowspan="2">électromagnétiques
$h\nu < 12.4$ eV
$\lambda > 0.1$ μm</td><td rowspan="2">électromagnétiques
$h\nu > 12.4$ eV
$\lambda < 0.1$ μm</td><td colspan="3">particules</td></tr>
<tr><td>non chargées</td><td colspan="2">chargées</td></tr>
<tr><td rowspan="2">UV - visible - IR
micro ondes
ondes radio</td><td rowspan="2">photons X et γ</td><td rowspan="2">neutrons</td><td>légères</td><td>lourdes</td></tr>
<tr><td>β^+ β^-</td><td>α p+</td></tr>
</table>

Rayonnements ionisants effets biologiques

- Ionisation d 'atomes ou molécules



cascade d 'événements dans les cellules



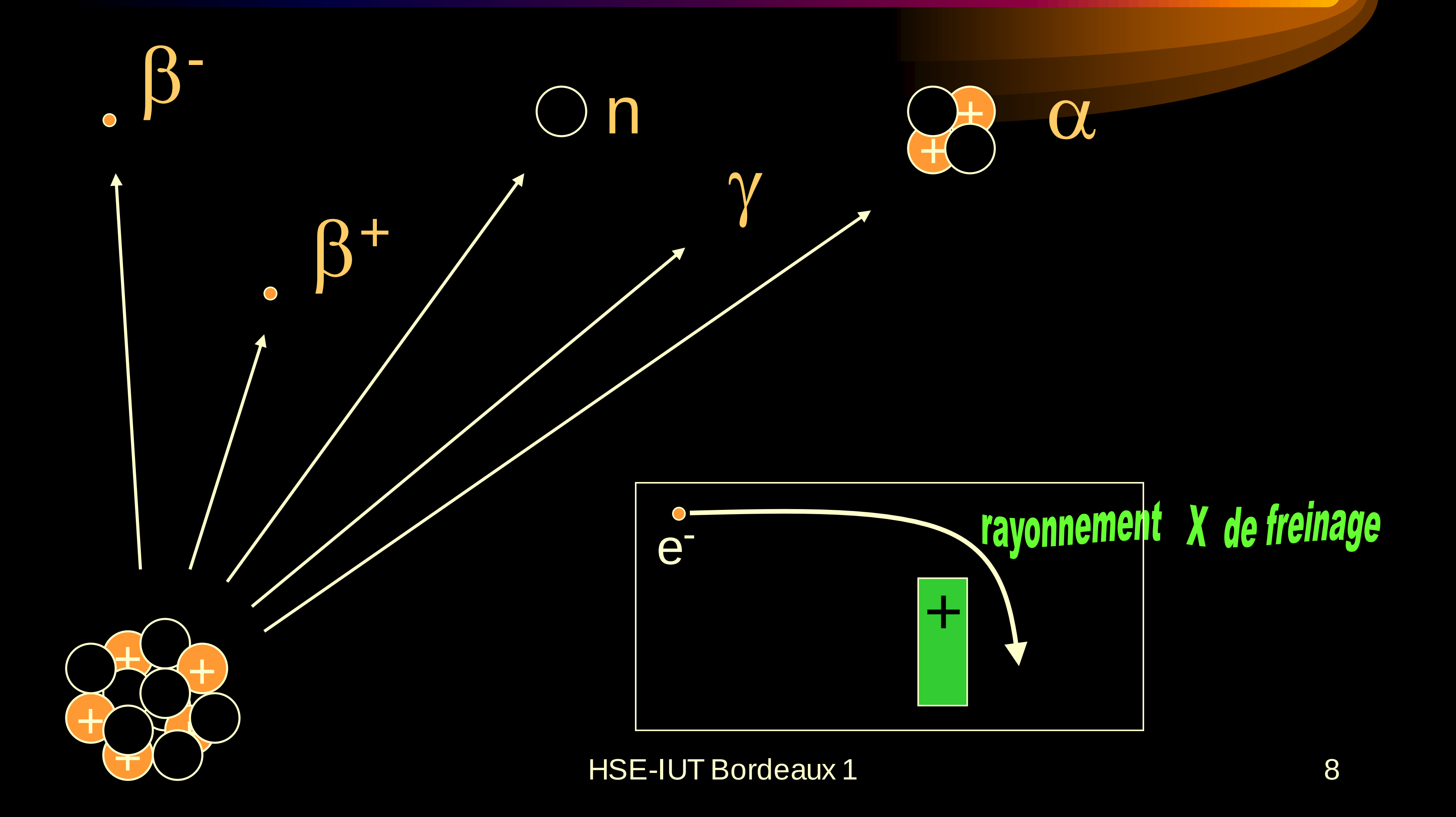
Origine des rayonnements ionisants utilisés en milieu industriel

- Sources radioactives
- Générateurs de rayons X
- Accélérateurs de particules

Les rayonnements ionisants
sommaire

- Origine-Notions de physique des rayonnements ionisants
- Identification des rayonnements ionisants
- Interactions rayonnements-matière
- Grandeurs et unités
- Expositions - types - origines
- Effets biologiques des R.I.
- Radioprotection
  - réglementation
  - évaluation des risques
  - mise en place des moyens de protection
  - détection des rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants
origine : les radionucléides et le freinage



La physique des rayonnements ionisants

le noyau atomique

	symbole	abondance
éléments	X	109
nucléides	${}^{A}_{Z}X$	~ 3000
stables		~ 300
instables		~ 2700

A = nombre de masse ; Z = numéro atomique ; A-Z = nombre de neutrons

La physique des rayonnements ionisants

typologie des noyaux

ISOTOPES	Z ≡ ; A et N ≠	${}^{1}_{1}H$ ${}^{2}_{1}H$ ${}^{3}_{1}H$
ISOBARES	A ≡ ; Z et N ≠	${}^{239}_{92}U$ ${}^{239}_{93}Np$ ${}^{239}_{94}Pu$
ISOTONES	N ≡ ; Z et A ≠	${}^{60}_{27}Co$ ${}^{61}_{28}Ni$ ${}^{62}_{29}Cu$ ${}^{63}_{30}Zn$
ISOMERES	A et Z ≡ ; E ≠	état excité $\xrightarrow{\gamma}$ état fondamental

La physique des rayonnements ionisants
le noyau atomique – équivalence masse énergie

1905…… Einstein postule que la masse est une des formes que peut prendre l'énergie

postulat d' Einstein: un système de masse m possède, lorsqu'il est au repos, une énergie

$$E = m.c^2$$

E: énergie du système en joules (J)   m: masse du système en kilogrammes (kg)

c: vitesse de la lumière dans le vide ($3{,}0.10^{8}$ $m.s^{-1}$) - constante universelle

La physique des rayonnements ionisants
le noyau atomique - expression des énergies

Le joule est une unité d'énergie inadaptée à l'échelle microscopique; on utilise plutôt l'électron volt (eV)

$1\ eV = 1,60\ .\ 10^{-19}\ J$

et ses multiples

le keV: $1\ keV = 10^{3}\ eV = 1,60\ .\ 10^{-16}\ J$

le MeV: $1\ MeV = 10^{6}\ eV = 1,60\ .\ 10^{-13}\ J$

La physique des rayonnements ionisants
le noyau atomique - expression des masses

- différencier nombre de masse (nombre de nucléons) et masse exacte (masse atomique)
- choix d'une unité de masse mieux adaptée que le kg (SI) : unité de masse atomique uma

par définition

1uma = 1/12 de la masse du noyau de ^{12}C

Donc la masse exacte du ^{12}C = 12,000 uma , et 1 mole d'atomes de ^{12}C a, par définition, une masse de 0,012 kg , elle contient $6{,}022.10^{23}$ atomes de carbone

$$1\text{uma} = \frac{1 \times 12.10^{-3}}{12 \times 6{,}022.10^{23}} = 1{,}66055 \,.\, 10^{-27}\ \text{kg}$$

La physique des rayonnements ionisants
le noyau atomique - expression des masses

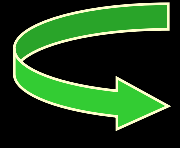
La physique nucléaire donne les valeurs suivantes:

	uma	kg	Mev / c^2
uma	1	$1{,}66055.10^{-27}$	931,5
électron	0,0005486	$9{,}10953.10^{-31}$	0,511003
proton	1,007276	$1{,}67265.10^{-27}$	938,280
neutron	1,008665	$1{,}67496.10^{-27}$	939,573

$E = mc^2$ $m = E / c^2$ en MeV / c^2, unité qui permet de connaître directement l'énergie associée à une particule

La physique des rayonnements ionisants
le noyau atomique – les forces nucléaires

Interaction coulombienne



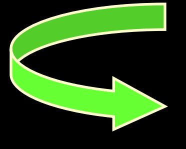
forces de répulsion entre les protons

Interaction nucléaire forte



forces d'attraction entre les nucléons

Interaction nucléaire faible

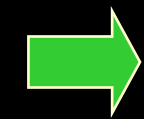


transformations neutrons ⟷ protons

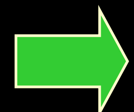
La physique des rayonnements ionisants

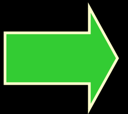
les transformations radioactives

transformations par partition

noyaux trop riches en nucléons  radioactivité α - fission

transformations isobariques

noyaux trop riches en neutrons  radioactivité β^-

noyaux trop riches en protons  radioactivité β^+

La physique des rayonnements ionisants

le noyau atomique
stabilité - instabilité

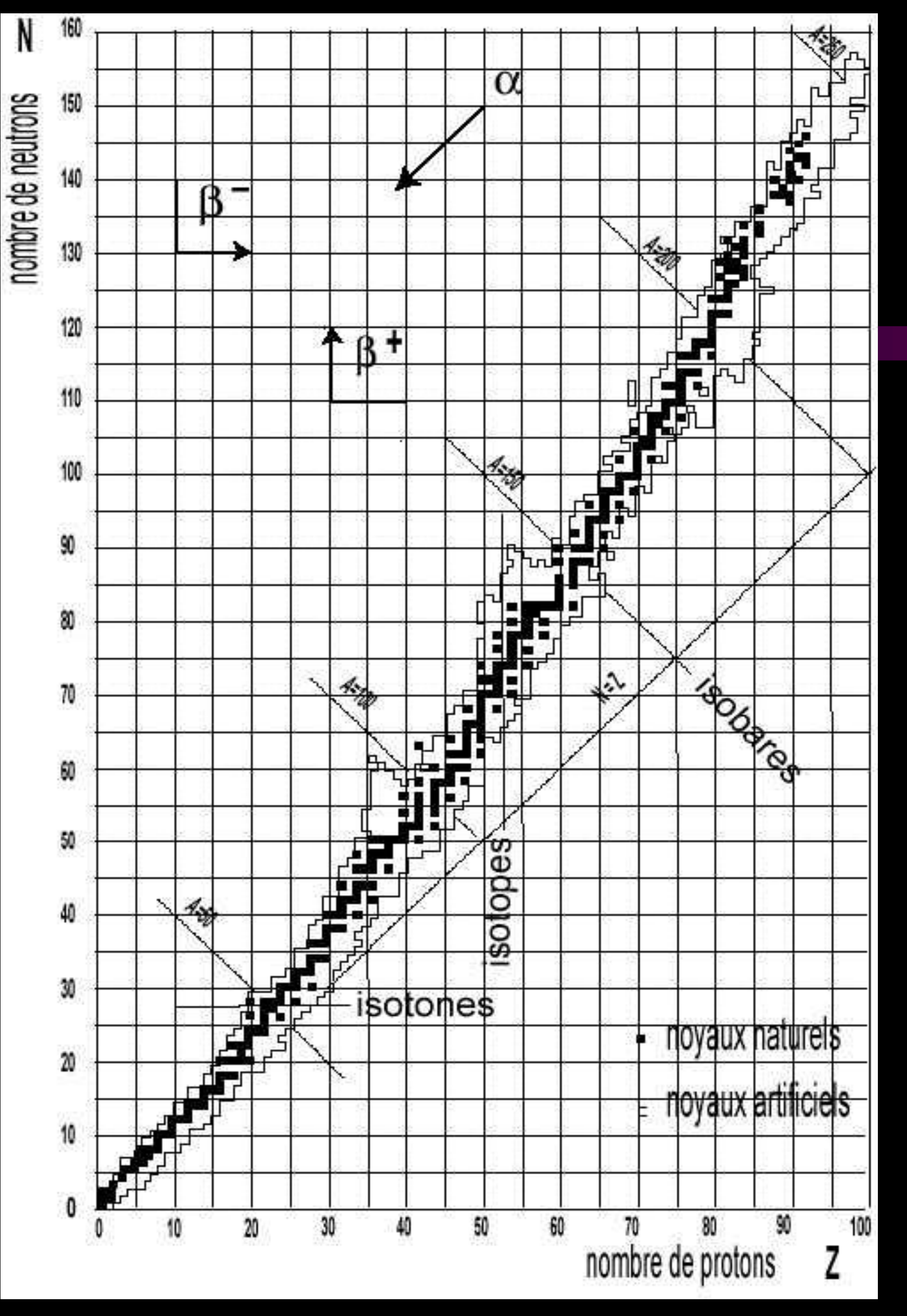


diagramme N/Z des noyaux stables et radioactifs

La physique des rayonnements ionisants

le noyau atomique - défaut de masse



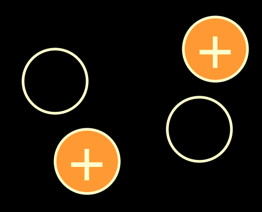
défaut de masse Δm

qui selon $\Delta E = \Delta m\, c^2$

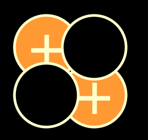
correspond à

l'énergie de liaison des nucléons

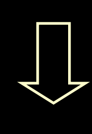
La physique des rayonnements ionisants
le noyau atomique - énergie de liaison



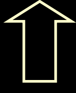

fusion



m = masse du système



El = énergie globale de liaison



$$En = \frac{El}{A} = \frac{\Delta m\, c^2}{A} =$$ énergie de liaison par nucléon ⇧


En ⇧ : stabilité du noyau ⇧

En= Outil permettant de comparer la stabilité des noyaux entre eux

La physique des rayonnements ionisants

évaluation de l'énergie de liaison

$^{2}_{1}H$ $m_d = 2{,}013554$ uma

$m_p + m_n = 1{,}007277 + 1{,}008665 = 2{,}015942$ uma

$\Delta E = (\underbrace{2{,}015942 - 2{,}013554}_{\Delta m}) \times 931{,}5 = 2{,}22$ MeV

? exercice :
calcul de El
et En de $^{4}_{2}[He]$

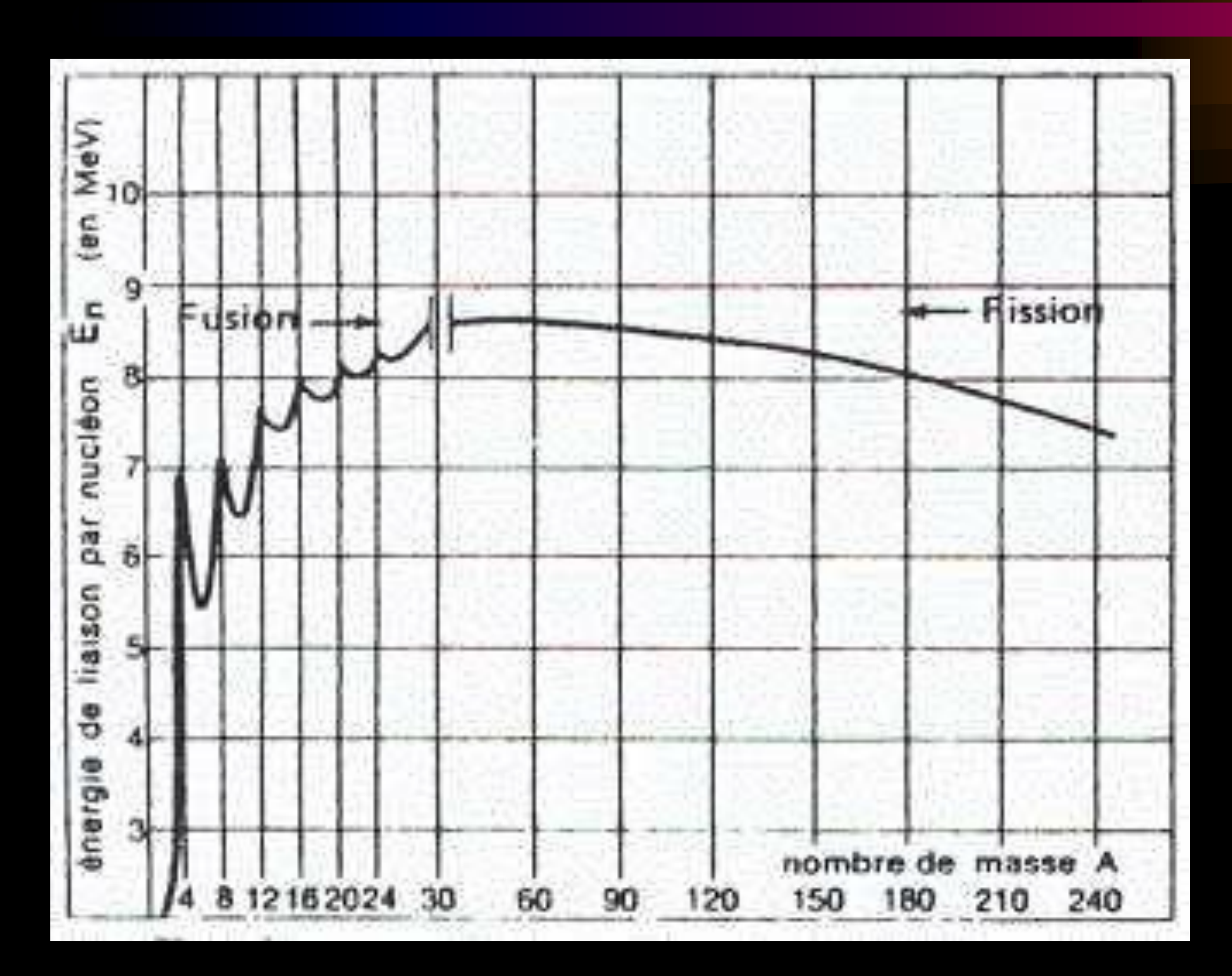
La physique des rayonnements ionisants

énergie de liaison par nucléon

	En MeV	E libérée/mole MeV	E libérée/mole J
$^{4}_{2}He$	7,07	170.10^{23}	$2,7.10^{12}$
$^{238}_{92}U$	7,57	106.10^{25}	$1,7.10^{14}$
$^{56}_{26}Fe$	8,79	296.10^{24}	$4,74.10^{13}$

1 MeV = $1,6.10^{-13}$ J

La physique des rayonnements ionisants
énergie de liaison et stabilité des noyaux



? exercice : calcul de l'énergie de fission et de fusion

Energie de liaison par nucléon

La physique des rayonnements ionisants

constante radioactive - période - activité

La constante radioactive λ représente la probabilité pour qu'un atome se désintègre dans l'unité de temps

La période radioactive ou demi-vie T est la durée nécessaire pour qu'un échantillon contenant N atomes radioactifs n'en contienne plus que N/2

L'activité $A_{(t)}$ d'une substance radioactive représente le nombre moyen de désintégrations par seconde

La physique des rayonnements ionisants

loi de décroissance - période - activité

Le nombre moyen de noyaux qui se transforment pendant une durée dt est proportionnel à : la durée dt , Nt , et λ

$$dNt = -\lambda.Nt.dt \quad ; \quad dNt / Nt = -\lambda dt$$

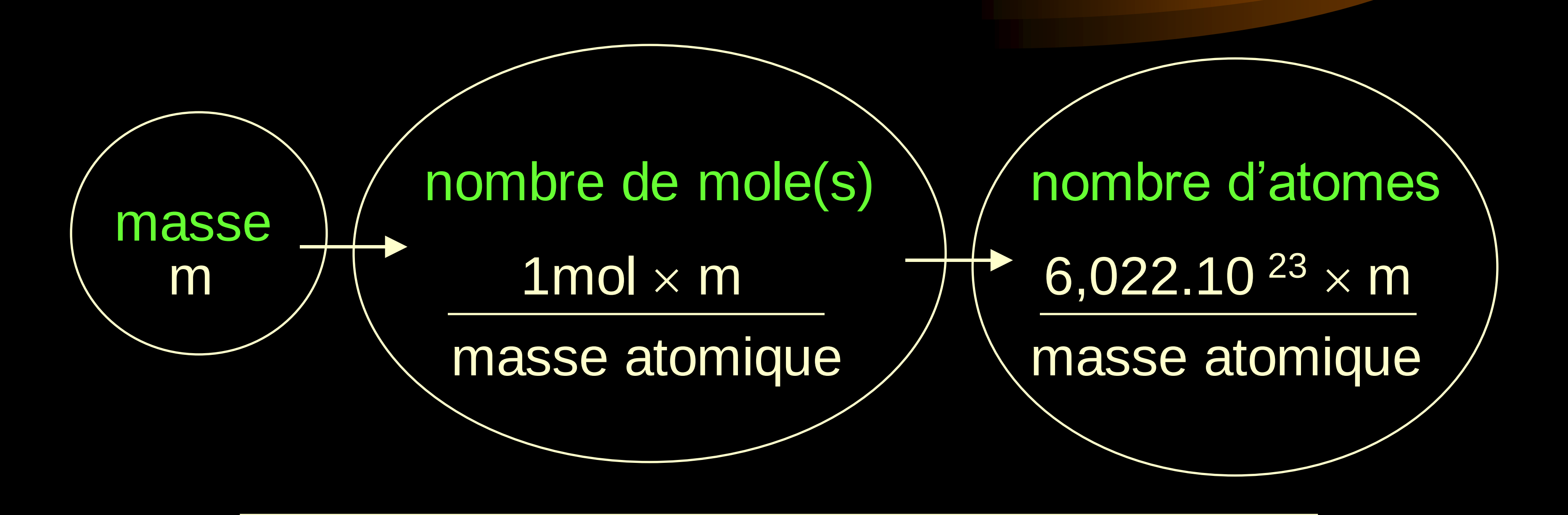
Si à to, il y a No noyaux , on obtient par intégration Nt à la date t $Nt = No \cdot e^{-\lambda t}$

Période T $Nt / No = 1/2 = e^{-\lambda T}$; $T = 0,693 / \lambda$

Activité $At = dNt / dt = \lambda Nt$; $At = Ao \cdot e^{-\lambda t}$

La physique des rayonnements ionisants

correspondance masse - activité des radionucléides



$$\text{Activité}(t) = \text{nombre d'atomes}(t) \times \lambda$$

La physique des rayonnements ionisants
correspondance masse - activité des radionucléides

$$At = \lambda \,.\, Nt$$

$$At = \frac{0{,}693}{T} \times \frac{6{,}02 \,.\, 10^{23}}{A} \times m$$

At en becquerels
T en secondes
m et A en grammes

$$m = \frac{At \times T \times A}{0{,}693 \times 6{,}02 \,.\, 10^{23}}$$

Activité spécifique : activité / mole

Activité massique : activité / g

Les rayonnements ionisants

<u>α</u>

<u>β^+</u>

<u>β^-</u>

<u>γ</u>

<u>X</u>

<u>n</u>

Rayonnement α

- 4 nucléons (2 protons + 2 neutrons ; hélium)
- Transformation de noyaux lourds (A > 209)

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X + {}^{4}_{2}He $$
$$ {}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He $$
$$ {}^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He $$

- Energie : 4 à 9 MeV ; spectre de raies

Rayonnement ß⁻

- Electrons nucléaires
- Nucléides contenant un excès de neutrons transformation isobarique

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{+1}p + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}X + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

$$^{28}_{13}Al \rightarrow {}^{28}_{14}Si + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

$$^{32}_{15}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

- Energie : de 10 keV à 4 MeV ; spectre continu

Rayonnement ß⁺

- Electrons nucléaires positifs (positons)
- Nucléides contenant un excès de protons
  transformation isobarique

$$^{1}_{+1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

$$^{68}_{31}Ga \rightarrow {}^{68}_{30}Zn + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

$$^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

- Energie : de 10 keV à 2 MeV ; spectre continu

Rayonnement γ

- Photons
- Emis à la suite d´ une transformation α ou β , réarrangement de la structure nucléaire

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He + \gamma\,(187\,keV)$$

$$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e + \gamma\,(1{,}17\,MeV) + \gamma\,(1{,}33\,MeV)$$

- Emis lors de l´ annihilation de particules

- Energie : de 100 keV à 10 MeV

Rayonnement X

- Photons

- Capture électronique (noyaux trop riches en protons)

- Ralentissement des électrons dans la matière (rayonnement de freinage)

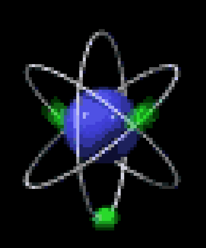
- Energie : capture , de 10 eV à 100 keV (spectre de raies)
  freinage , atteint le GeV (spectre continu)

Rayonnement neutronique

- Faisceaux de neutrons
- Origine artificielle : réacteurs, armes nucléaires, accélérateurs

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2\,{}^{1}_{0}n $$

- Energie : neutrons thermiques ≅ 0,025 eV
  neutrons lents ≅ keV
  neutrons rapides ≅ MeV



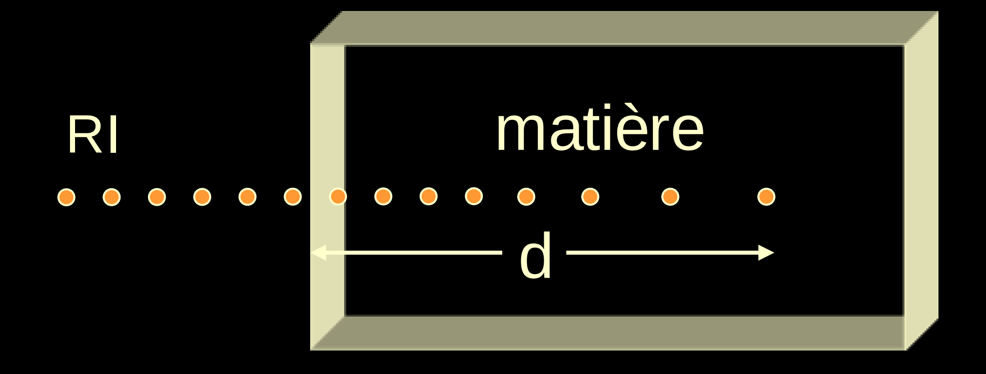
Rayonnements ionisants

interactions avec la matière

la probabilité d ' interaction RI-matière dépend

1-de la nature du rayonnement

2-du milieu considéré



Ionisations

perte d'énergie

distance parcourue

pouvoir d'arrêt du milieu

calcul d'écrans de protection

Rayonnements ionisants

interactions avec la matière

- La probabilité d ' interaction RI-matière dépend

  de la nature du rayonnement (photon , particule chargée ou non , particule lourde ou légère)

  du milieu considéré (numéro atomique , énergie de liaison minimale des électrons)

- Ionisations $\rightarrow$ perte d ' énergie $\rightarrow$ **distance parcourue dans la matière**

- Transfert linéique d ' énergie (TLE)

  dE/dl (keV . μm^{-1}) $\rightarrow$ **pouvoir d ' arrêt du milieu traversé**

Rayonnements ionisants
interactions avec la matière

Particules chargées lourdes (α , protons)

- *interactions coulombiennes avec les électrons* → ionisations

➡ *p* forte→ TLE élevé → parcours limité (air < 10 cm , tissus : 2 à 4 cellules , arrêtés par la couche cornée de la peau)

Particules chargées légères (β^- , β^+)

- *interactions avec les électrons* → ionisations (β^-)
  → dématérialisation (β^+) avec émission de 2 γ de 511 keV
- *interactions avec les noyaux* → rayonnement de freinage (β^-)

➡ *p* faible , parcours sinueux (air : qq m ; tissus ~ 1 cm)

Rayonnements ionisants

interactions avec la matière

Les rayonnements électromagnétiques (X , γ)

- *interactions avec les électrons* (effets probabilistes) :
  effet photoélectrique et effet Compton
- *interactions avec les noyaux* (effets à seuil) :
  production de paires (matérialisation)

– dans la matière ces 3 effets se combinent

pour un matériau donné $\rightarrow$ probabilité d ' interaction des photons $\rightarrow$ coefficient d ' atténuation μ

$$\Phi = \Phi_o e^{-\mu x}$$

➡ *p* faible , parcours long (air > 100 m ; atteinte des tissus et organes profonds)

Rayonnements ionisants

interactions avec la matière

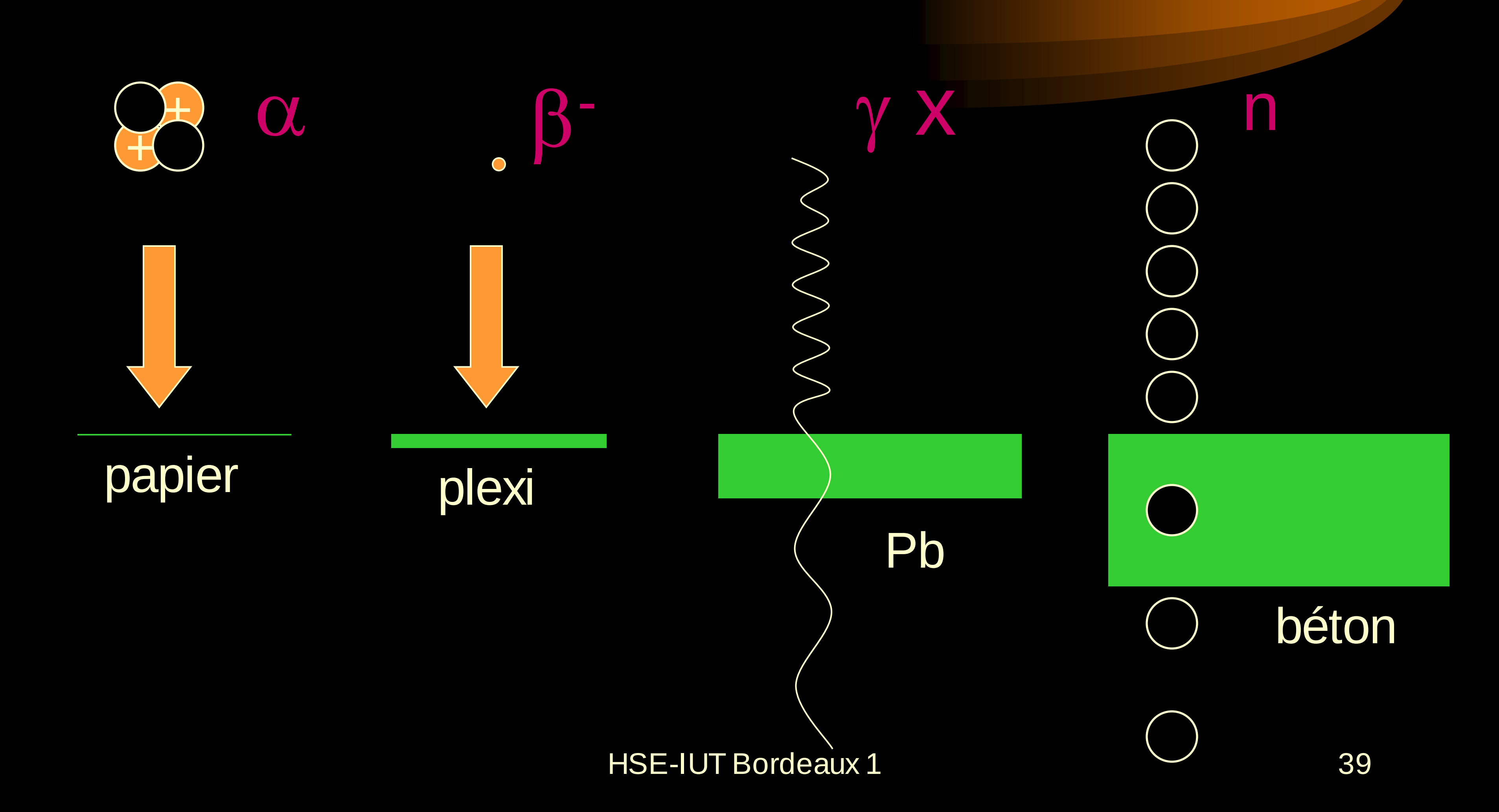
Les rayonnements neutroniques

interactions avec les noyaux

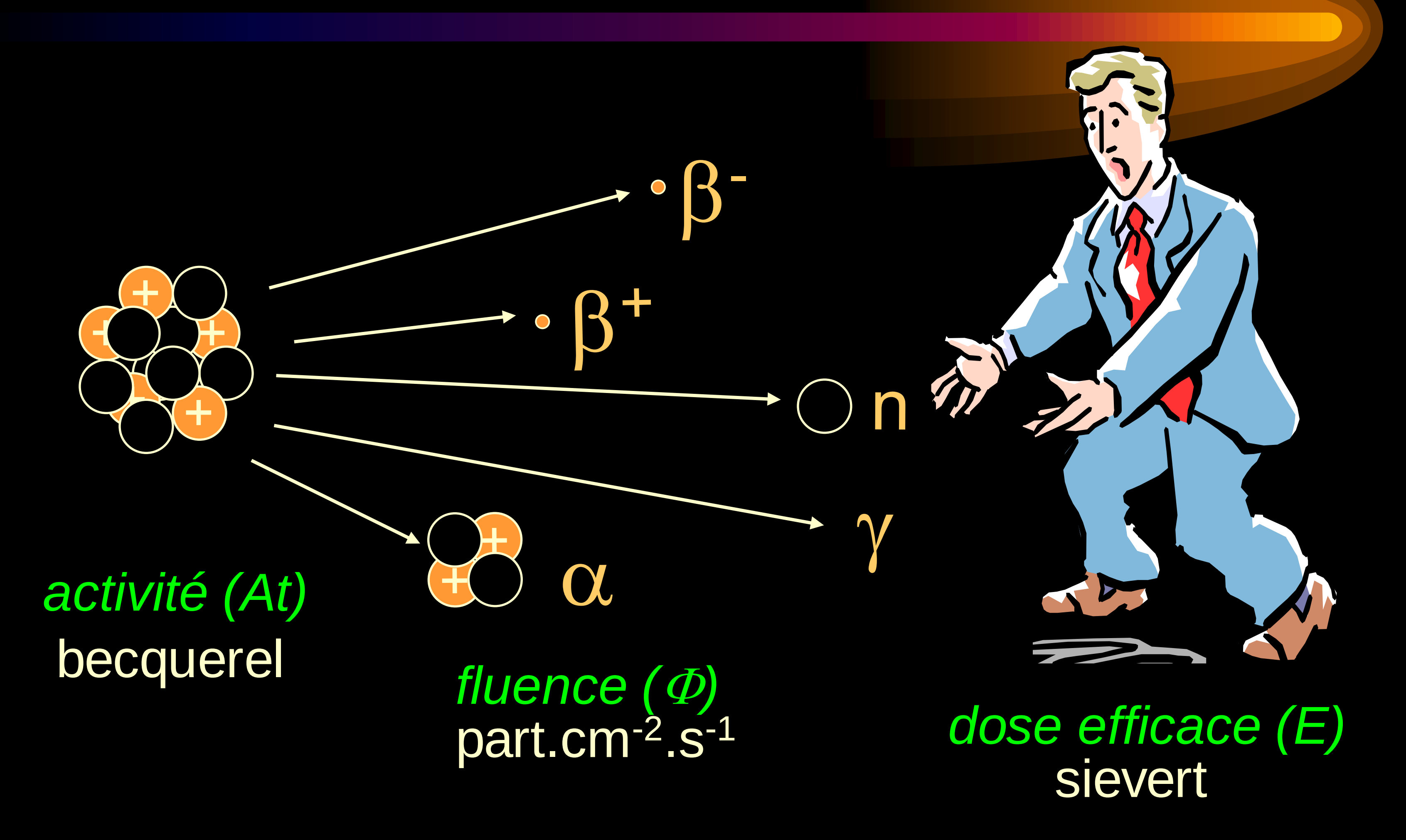
- choc (diffusion) élastique (neutrons rapides-noyaux légers)
  choc (diffusion) inélastique (neutrons rapides-noyaux lourds)
- capture (absorption) radiative (neutrons lents)
  capture (absorption) non radiative (neutrons lents ou rapides)

➡ *p* faible ; parcours : air > 100 m ; tissus vivants , dégâts importants (protons de recul)

Rayonnements ionisants
interactions avec la matière



Rayonnements ionisants
grandeurs et unités



Grandeur dosimétrique fondamentale:

Dose absorbée (D)

	Unité SI	
nom	symbole	expression
gray	Gy	1J/kg

Rayonnements ionisants
grandeurs dosimétriques

- Dose absorbée par un organe ou tissu T : $\mathbf{D_T}$ (Gy)

- Dose équivalente [$\mathbf{H_T}$] *(1 organe ou tissu)*

$$\mathbf{H_T = D_T \times W_R} \text{ (sievert ; Sv)}$$

W_R : facteur de pondération radiologique , tient compte de la nature du rayonnement

- Dose efficace [**E**] *(plusieurs organes ou corps entier)*

$$\mathbf{E} = \sum (\mathbf{H_T \times W_T}) \text{ (Sv)}$$

W_T : facteur de pondération tissulaire , tient compte de la radiosensibilité propre de chaque tissu ou organe

Rayonnements ionisants

grandeurs dosimétriques

source	*activité A_t*	*becquerel (Bq)*	s^{-1}
air	*fluence Φ*	particules / m^2	

tissu ou organe T		organisme
énergie transmise *dose absorbée D_T*	effet biologique (exposition partielle) *dose équivalente H_T* $H_T = D_T \times w_R$	effet biologique (exposition globale) *dose efficace E* $E = \Sigma\,(D_T \times w_R \times w_T)$
$J.\,kg^{-1}$ *gray (Gy)*	$J.\,kg^{-1}$ *sievert (Sv)*	

Rayonnements ionisants

facteurs de pondération radiologique (W_R)

Nature	Energie	W_R
Photons	toutes	1
Electrons	toutes	1
Neutrons	<100 keV	10
	100 keV-2 MeV	20
Particules alpha		20

Rayonnements ionisants

facteurs de pondération tissulaire (W_T)

Organe	W_T
Gonades	0,20
Seins	0,05
Moelle osseuse	0,12
Colon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Foie	0,05
Oesophage	0,05
Thyroïde	0,05
Os	0,01
Peau	0,01
Reste de l 'organisme	0,05
Total	1,00

Rayonnements ionisants

facteurs de pondération tissulaire opérationnels

	W_T
surface de l' os, peau	0,02
seins, vessie, foie, œsophage, thyroïde, autres	0,30
moelle osseuse, colon, poumons, estomac	0,48
gonades	0,20
Total	1,00

Rayonnements ionisants

expositions

- **Exposition externe**

  par une source située à distance de l ' organisme ou au contact de la peau

  globale ou *partielle*

- **Exposition interne**

  par une source ayant pénétré à l ’ intérieur de l ' organisme (inhalation ou ingestion) suite à une contamination des milieux

  globale ou *partielle*

Rayonnements ionisants

les sources de l 'exposition humaine

Exposition naturelle	Exposition artificielle
Rayonnements cosmiques Rayonnements telluriques Dose efficace 2400μSv/an Débit faible: 0,27μSv par heure	Médicale 1100 μSv/an Explosions nucléaires 5 μSv/an Industrielle 1 à 200 μSv/an Domestique 50 μSv/an Professionnelle 1100 μSv/an Débits variables parfois élevés

Rayonnements ionisants

l 'exposition humaine d 'origine naturelle

- Exposition externe :

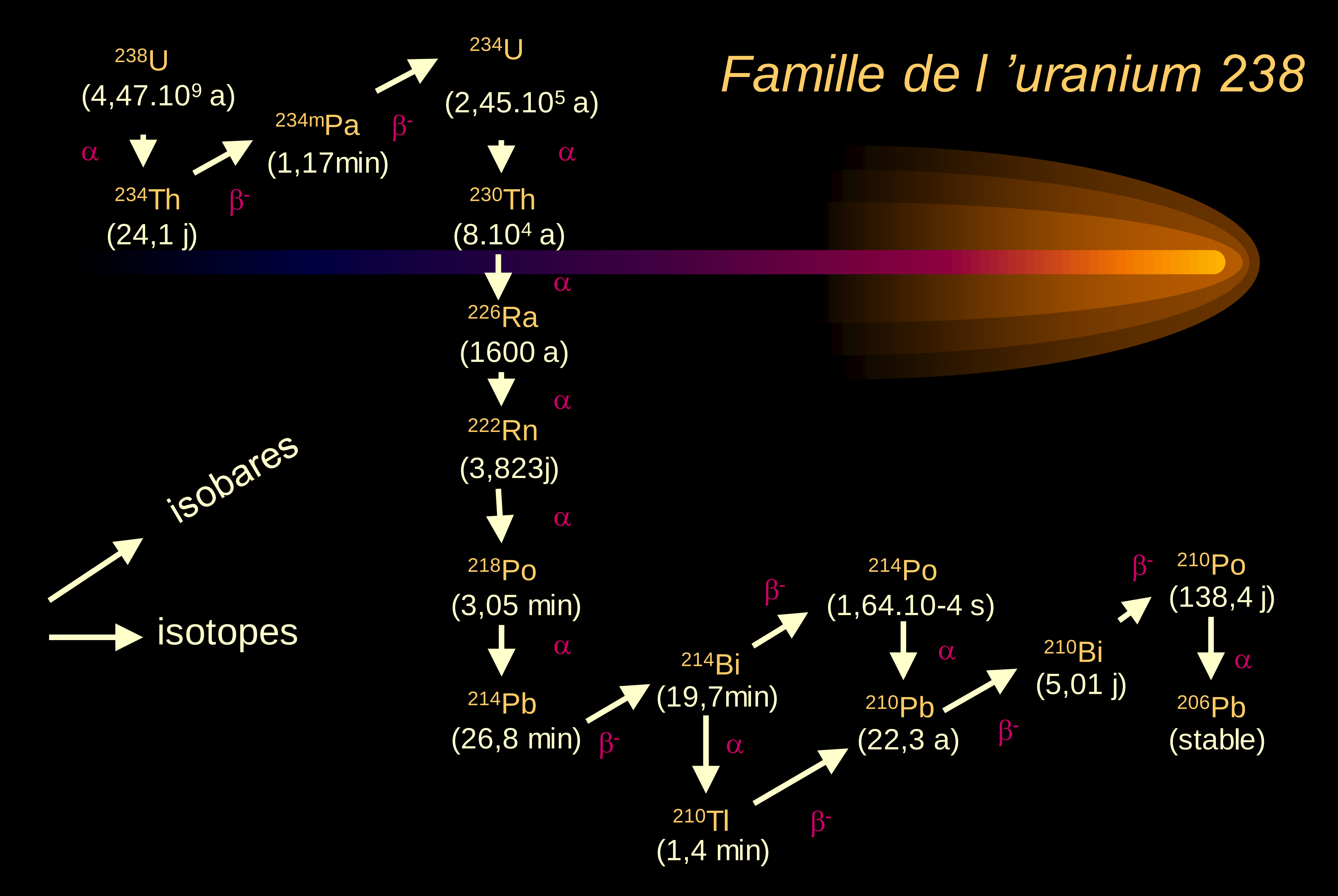
rayonnements cosmiques (galaxies , soleil)

rayonnements telluriques émis par les radionucléides primordiaux : ^{40}K (T=1,3.10^{9} a.), ^{87}Rb (T=43.10^{9} a.), familles de l ' ^{238}U (T=4,47.10^{9} a.) , du ^{232}Th (T=14,1.10^{9} a.), de l '^{235}U (T=7,04.10^{8} a.)

- Exposition interne :

par inhalation : radon (^{222}Rn; ^{220}Rn; ^{219}Rn) et ses descendants (Po; Pb; Bi; Tl)

par ingestion de tous les aliments (^{40}K, et radionucléides des familles de l '^{238}U, et du ^{232}Th)



Famille de l 'uranium 238
238U
(4,47.10⁹ a)
α
234Th
(24,1 j)
β-
234mPa
(1,17min)
β-
234U
(2,45.10⁵ a)
α
230Th
(8.10⁴ a)
α
226Ra
(1600 a)
α
222Rn
(3,823j)
α
218Po
(3,05 min)
α
214Pb
(26,8 min)
β-
214Bi
(19,7min)
α
210Tl
(1,4 min)
β-
β-
214Po
(1,64.10-4 s)
α
210Pb
(22,3 a)
β-
210Bi
(5,01 j)
β-
210Po
(138,4 j)
α
206Pb
(stable)
isobares
isotopes

Rayonnements ionisants

l 'exposition humaine d 'origine naturelle

Radioactivité de différents milieux naturels

Eau de pluie	0,3 à 1 Bq/l
Eau de rivière	0,07 Bq/l (^{226}Ra et descendants)
	0,07 Bq/l (^{40}K)
	11 Bq/l (^{3}H)
Eau de mer	14 Bq/l (^{40}K essentiellement)
Eau minérale	1 à 2 Bq/l (^{226}Ra, ^{222}Rn)
Lait	60 Bq/l
Sol sédimentaire	400 Bq/kg
Sol granitique	8000 Bq/kg
Corps humain	12000 Bq (6000 dus au ^{40} K)

Rayonnements ionisants
applications industrielles électronucléaires

Les industries du cycle du combustible nucléaire

- Mines d 'uranium
- Enrichissement de l 'uranium
- Fabrication du combustible
- Centrales nucléaires
- Retraitement des combustibles usés
- Stockage des déchets radioactifs
- Démantèlement des installations

Rayonnements ionisants
applications industrielles non électronucléaires

Les sources utilisées dans l 'industrie	*Principales applications*
Sources radioactives scellées. Générateurs de rayons X.	Radiographie - analyse,détection,dosage de molécules - jauges radiométriques- éliminateurs d 'électricité statique- détecteurs de fumée - radiotraitements chimiques - radiotraitements biologiques
Sources radioactives non scellées.	Utilisation de radionucléides comme traceurs : recherche biomédicale - études hydrologiques - tests de ventilation - détection de fuites gazeuses. Fabrication d 'objets lumineux.

UTILISATION DES SOURCES RADIOACTIVES EN RECHERCHE BIOMEDICALE RADIOANALYSE MEDECINE NUCLEAIRE

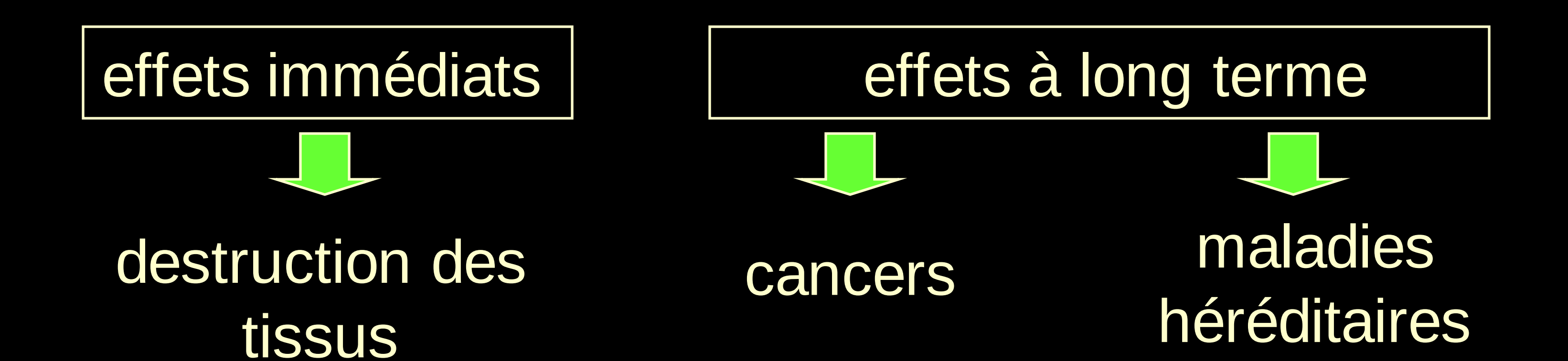
- scintigraphie, autoradiographie, liaison ligand marqué-récepteur, sonde génique, gel de séquençage
- dosages *in vitro* d'hormones, vitamines, enzymes, médicaments, toxiques, marqueurs tumoraux…
- radiodiagnostic, radiothérapie

Rayonnements ionisants
effets biologiques

- Ionisation d 'atomes ou molécules



cascade d 'événements dans les cellules



Rayonnements ionisants

effets biologiques… les déterminants

nature du ou des RI

unité d'incorporation

exposition

(globale ou partielle)

durée d ' exposition

débit de dose

radiosensibilité du ou des organes exposés

âge et sexe de la personne exposée

Rayonnements ionisants

effets biologiques

Effets déterministes

- Fortes doses
- Délai d 'apparition court
- Effets à seuil
- La gravité croît avec la dose

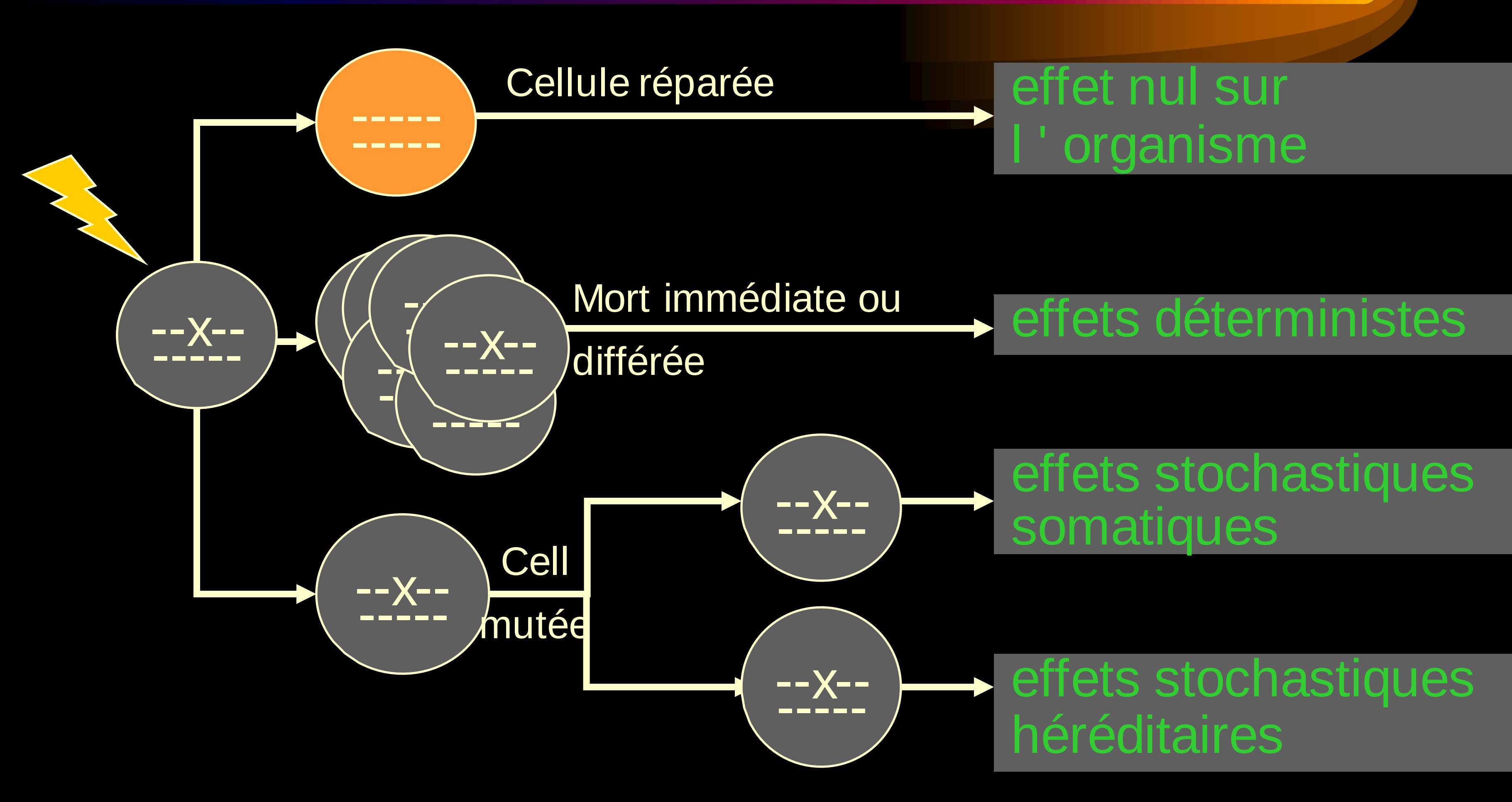
Effets stochastiques

- Faibles doses
- Délai d 'apparition long
- Pas de seuil
- Chez les individus atteints les effets sont identiques quelle que soit la dose
- La probabilité d 'apparition croit avec la dose



Rayonnements ionisants

effets biologiques



Rayonnements ionisants
effets déterministes , exposition partielle

TISSUS	EFFET	SEUIL (Gy)
Testicules	stérilité transitoire	0,15
	stérilité permanente	3,5 - 6,0
Ovaires	stérilité	2,5 - 6,0
Cristallin	cataracte	5,0
Peau	érythème	3 - 5
	phlyctènes	20
	nécroses	50

aucune lésion en dessous de 0,5 Sv / an

Rayonnements ionisants

effets déterministes , exposition globale

D(Gy)	forme	symptômes
< 0,5	infra-clinique	aucun signe clinique
0,5 à 2	réaction générale légère	asthénie, nausées, vomissements 3 à 6 h après l 'exposition, sédation en 24h
2 à 4	hématopoïétique modérée	leucopénie, thrombopénie, anémie maximale 3 semaines après l 'exposition retour à la normale en 4 à 6 mois
4 à 6	hématopoïétique grave	hémorragies, aplasie . DL 50 : 4 à 4,5 Gy
6 à 7	gastro-intestinale	diarrhée, vomissements, hémorragies
8 à 10	pulmonaire	insuffisance respiratoire aiguë
>10	cérébrale	coma, mort en 14 à 36 h

Rayonnements ionisants

effets déterministes , exposition durant la grossesse

stade	période	effets
pré-implantation	0-8 jours	mort intra-utérine ou développement normal
organogénèse	9-60 j	mort intra-utérine , malformations
stade foetal	60-270 j	malformations du SNC , retard mental , troubles de croissance

Risque négligeable < 0,1 Sv ? ; existence d'un seuil ~ 0,2 Sv ?

Protection particulière pendant la grossesse et l'allaitement sur les lieux de travail (<1mSv)

Rayonnements ionisants

méthode d ' estimation des risques stochastiques

Première étape

Données épidémiologiques
doses fortes , débits élevés



Appréciation du risque pour les doses faibles

Deuxième étape

Données expérimentales



Estimation d ' un facteur prenant en compte le débit de dose

Troisième étape

Modèle de projection



Appréciation du risque pour la vie entière

Rayonnements ionisants
probabilité d 'apparition d ' effets stochastiques

Probabilité de risque de décès d ' individus exposés à de faibles doses délivrées à faibles débits (% . Sv^{-1} . $homme^{-1}$)

	CIPR 26	CIPR 60
Effets cancérogènes	1,25 . 10^{-2} . Sv^{-1}	4,5 . 10^{-2} . Sv^{-1}
Effets héréditaires	0,4 . 10^{-2} . Sv^{-1}	1,1 . 10^{-2} . Sv^{-1}
Total	1,65 . 10^{-2} . Sv^{-1}	5,6 . 10^{-2} . Sv^{-1}

Décès excédentaires pour 1 000 000 de personnes recevant

une dose de 10 mSv	165	560

Rayonnements ionisants

effets biologiques , les sources d 'information

- Les études in vitro.
- L 'expérimentation animale.
- Les enquêtes épidémiologiques ,

populations exposées à de faibles doses ,

population exposée à des doses moyennes ou fortes :

pour raisons professionnelles

pour raisons médicales

survivants d 'Hiroshima et de Nagasaki

accident de Tchernobyl

Radioprotection

Les recommandations de la CIPR

- *Justification* des pratiques utilisant des RI

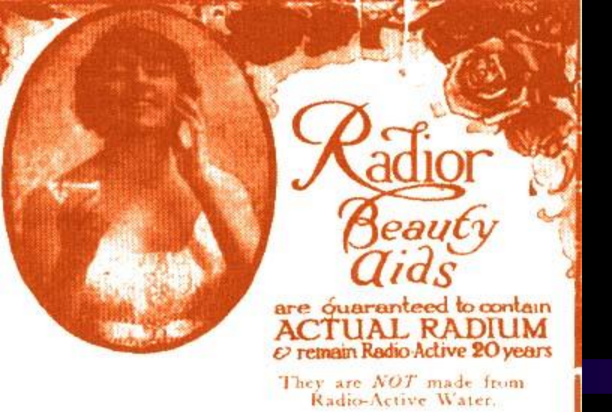
  toute activité humaine susceptible d ' entraîner une exposition aux RI doit être justifiée par les avantages qu ' elle procure pour la société (bénéfices > inconvénients)

- *Limitation* des doses individuelles (cible)

  les limites sont choisies suffisamment basses pour qu ' aucun effet déterministe n ' apparaisse , et que la probabilité d ' effets stochastiques soit « tolérable ou acceptable »

- *Optimisation* de la radioprotection (source)

  l ' exposition des individus et des populations doit être maintenue au niveau le plus bas que l ' on puisse atteindre compte tenu des facteurs économiques et sociaux



RADIUM is the most marvellous skin rejuvenator known to science. Eliminates every blemish, and quickly ensures perfect skin-health, with natural youthful bloom.

"RADIOR" VANISHING CREAM
An Ideal Day Cream of the finest Ingredients, with actual Radium. 5 9 per jar.

"RADIOR" PEAU DE VELOURS.
Exquisite Face Cream and Skin Food for Night use. 5 9 per jar.

"RADIOR" HAIR TONIC.
Prevents premature greyness. Eradicates Dandruff, Promotes luxurious Glossy Hair.
5 9 per bottle ; Double size, 10 6

"RADIOR" SHAMPOO POWDER.
Hair Cleanser, par excellence, subtly Fragrant, Refreshes and Invigorates.
6d. per tube ; 5 - box of twelve.

"RADIOR" FACE AND CHIN PAD.
Dainty Silk Pad, filled actual Radium. Worn during Rest or Sleep, removes all tendency to "Double Chin." Price 15 -

"RADIOR" FOREHEAD PAD.
Smaller than the Face Pad. Eradicates Wrinkles, "Crow's Feet," &c. Relieves Insomnia, Headache, Neuralgia. Price 7 6

On sale in Hairdressing Department of
Harrods, Selfridges, Whiteleys, D. H. Evans, Barkers ; *Drug Dept.*, Army and Navy Stores,

THE RADIO CO.

The
RADIOR C^OY
167 Oxford Street
W

Radioprotection
réglementation

Publicité pour une ligne de produits de beauté parue dans Vogue en novembre 1916

Radioprotection
réglementation



Produit de beauté au thorium commercialisé dans les années 1920

L'EAU DE ***DIRZA*** EST LA PLUS PURE, LA PLUS DIGESTIVE ET LA PLUS AGRÉABLE DES EAUX CONNUES



ZILIA PAR CALVI

EAU DE TABLE DE DIRZA

LA SEULE EAU DE TABLE FORTEMENT RADIOACTIVE

L'EAU DE DIRZA (Corse), douée d'une saveur agréable, est éminemment apéritive, digestive et diurétique. Prise avant le repas (1 ou 2 verres), elle stimule l'appétit; absorbée pendant le repas, elle rend la digestion agréable et facile; son action diurétique est toujours intense. Un seul verre d'EAU DE DIRZA dissipe en un quart d'heure tout malaise d'estomac, toutes nausées et vomissements. Les vomissements incoercibles de la grossesse sont généralement guéris après un traitement exclusif de 8 jours par l'EAU DE DIRZA. Bactéricide, l'EAU DE DIRZA prévient et guérit toutes les maladies d'origine microbienne. L'EAU DE DIRZA régularise les fonctions de l'estomac et de l'intestin; elle est très efficace contre l'inappétence, le surmenage et la neurasthénie.

Administration : 26, Rue Coriolis, PARIS
TÉLÉPHONE 935-8

L'EAU DE DIRZA (Corse) doit ses puissants effets à sa très faible minéralisation (70 milligr. par litre), à sa forte radioactivité et à ses gaz rares.

Dans ses études sur les eaux radioactives, M. Albert LABORDE, collaborateur de CURIE, apprécie en ces termes sa radioactivité :

« *Dix litres d'EAU DE DIRZA renferment, au griffon, plus de 0,42 milligr. minute d'émanation du radium.* »

Or, il est démontré que l'émanation du radium est bactéricide et empêche les fermentations anormales de l'estomac, et que les gaz rares ont un pouvoir diffusif considérable dont le rôle est prépondérant dans tous les échanges fonctionnels de la vie.

Vente en estagnons linogommes de 20 litres à fermeture inviolable

Dégustation et Bureau central des Commandes :
à PARIS, 6 et 8, Place de l'Opéra
TÉLÉPHONE 307-10

CORSE

CORSE

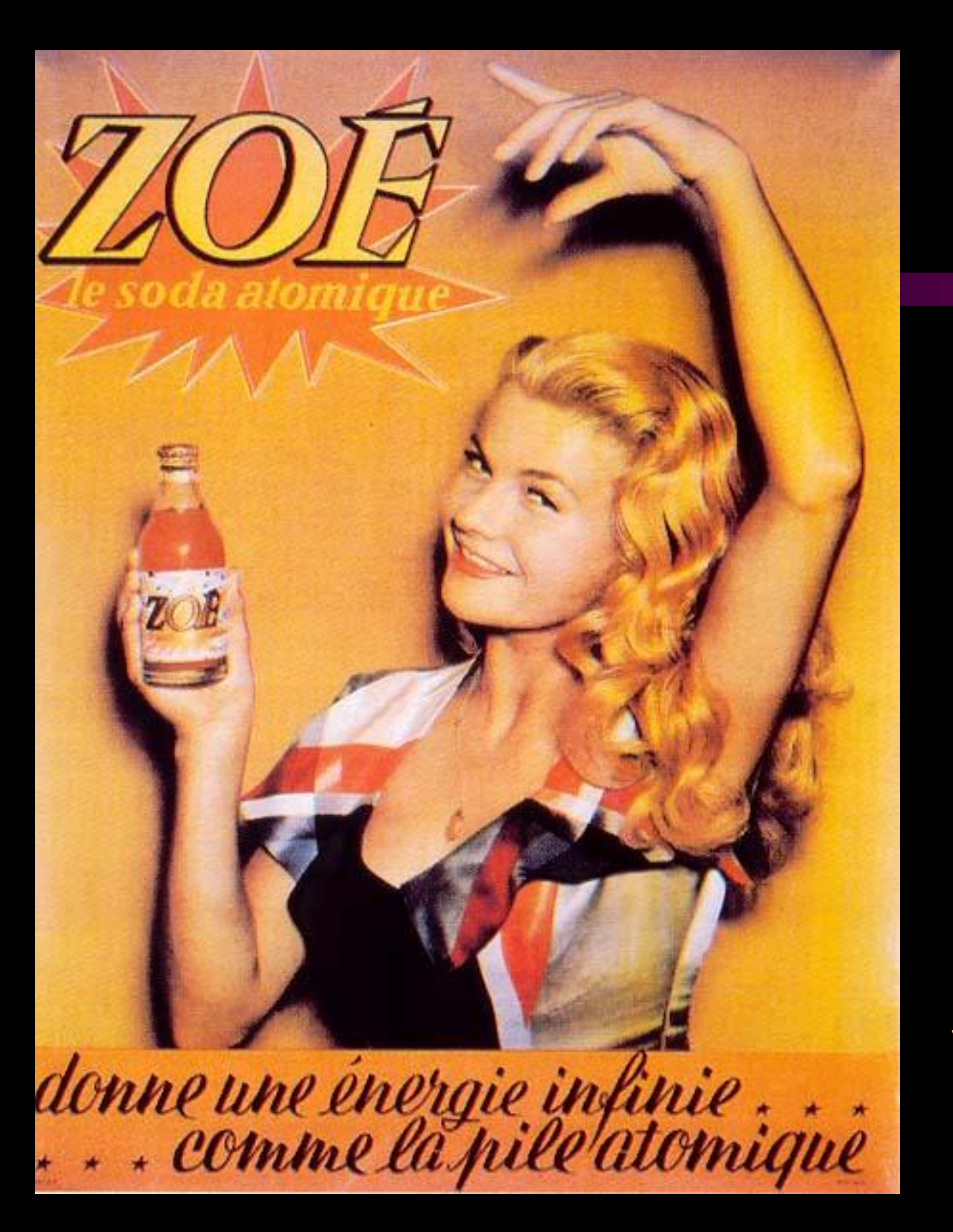
*Bactéricide, l'Eau de **DIRZA** se conserve indéfiniment*
Aucun échange n'est fait après réception

L'EAU DE ***DIRZA*** PRODUIT IMMÉDIATEMENT SES EFFETS
S'assurer que la bande de garantie est intacte

EN VENTE : CHEZ TOUS LES PHARMACIENS ET MARCHANDS D'EAUX MINÉRALES EN FRANCE ET A L'ETRANGER

Radioprotection

réglementation



Vers 1950, même après Hiroshima, l’énergie atomique reste un vecteur porteur pour la publicité

Radioprotection

problématique de la limitation des doses (CIPR 60)

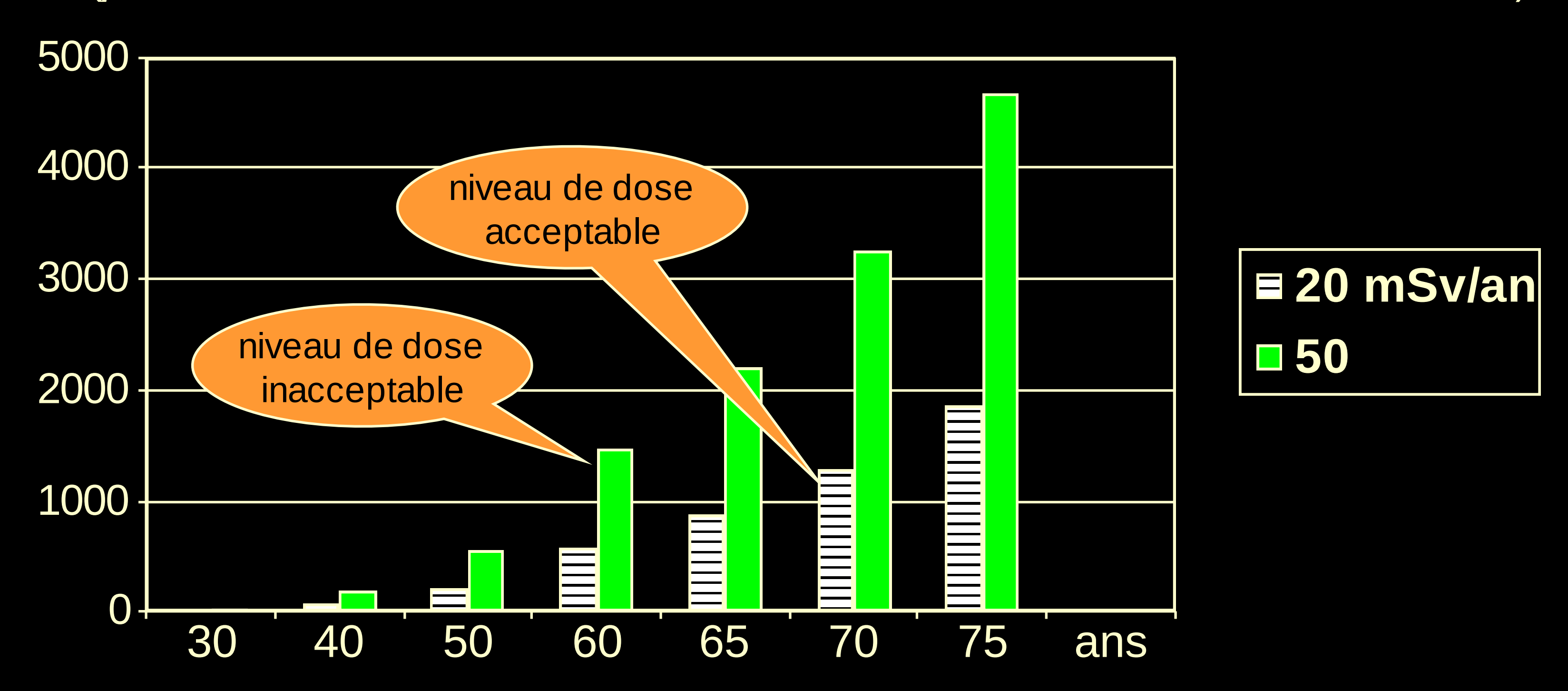
Une exposition peut être : ***inacceptable***
tolérable
acceptable

- Calcul de la probabilité de mort due à des expositions à des doses efficaces annuelles de 10 , 20 , 30 , 50 mSv
  - 50 mSv/an (dose cumulée sur 50 ans = 2,5 Sv)
    risque de décès dû à l ' exposition atteint avant 60 ans
    La CIPR estime ce niveau de dose inacceptable
  - 20 mSv/an (dose cumulée sur 50 ans = 1Sv)
    risque de décès dû à l ' exposition atteint à 70 ans
    La CIPR estime ce niveau de dose acceptable

Radioprotection

problématique de la limitation des doses (CIPR 60)

Probabilité annuelle de décès dus au cancer, par million
(*p*=10^{-3}, couramment observée dans l'industrie conventionnelle)



Radioprotection

limites de dose , exposition externe

Exposition globale

Travailleurs
20mSv/an

Public
1mSv/an

CIPR 60; Directive 1996

Décret « travailleurs » 31-3-2003

Décret « public » 4-4-2002

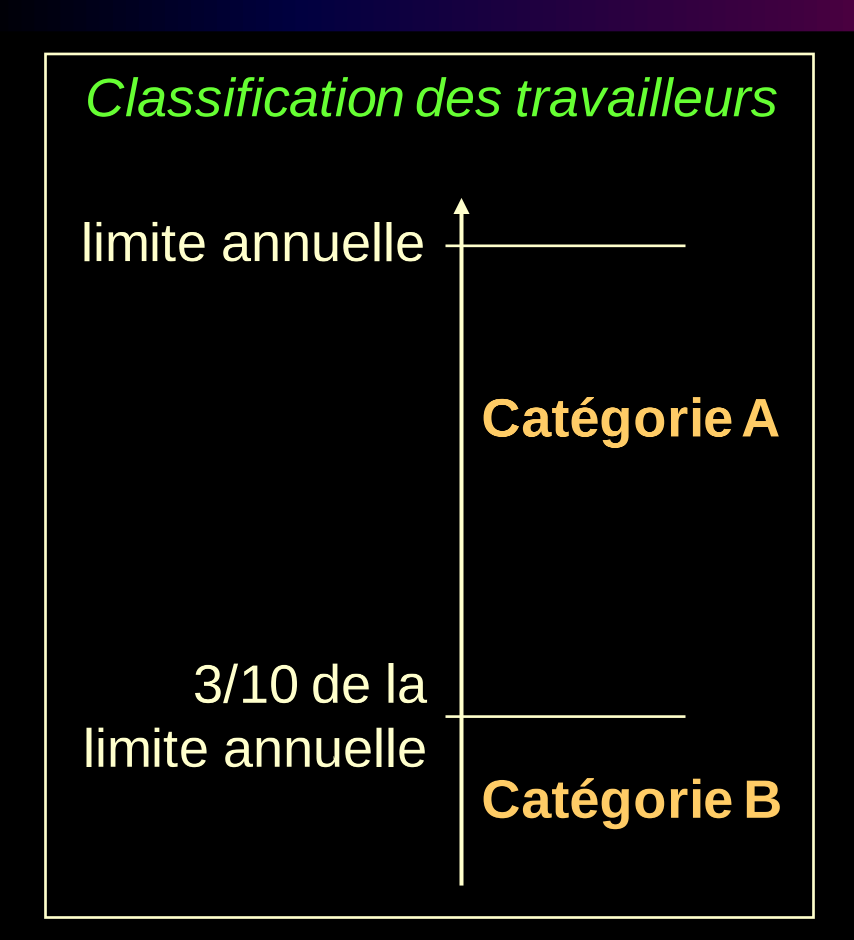
Exposition partielle

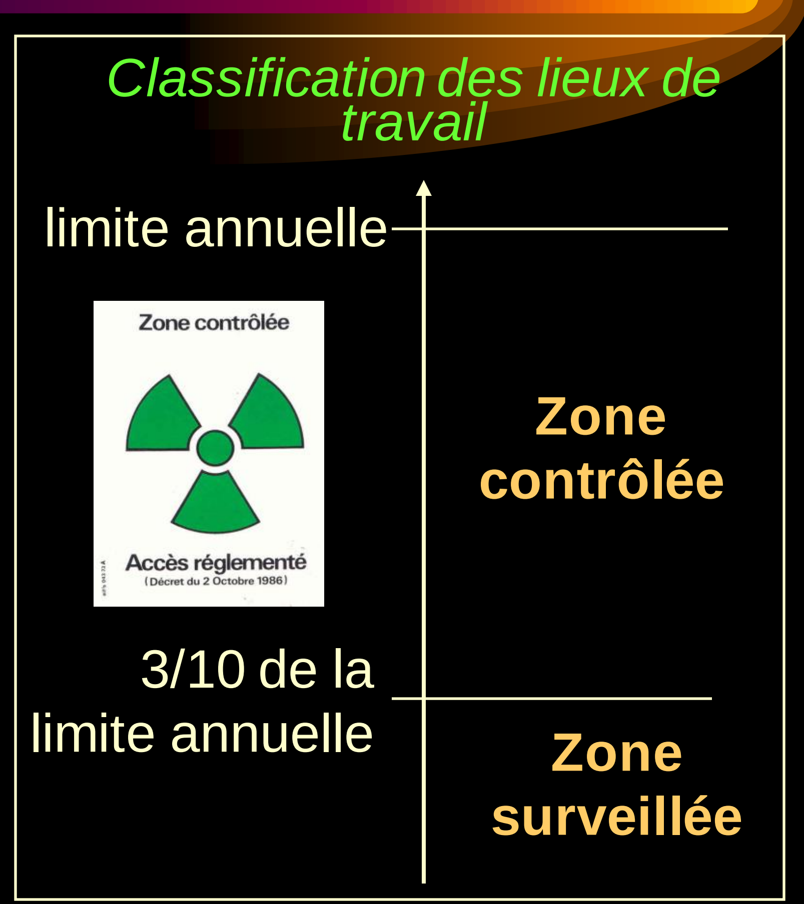
Travailleurs
peau: 500 mSv/an
cristallin: 150 mSv/an

Public
peau: 50 mSv/an
cristallin: 15 mSv/an

Radioprotection

protection opérationnelle des travailleurs exposés





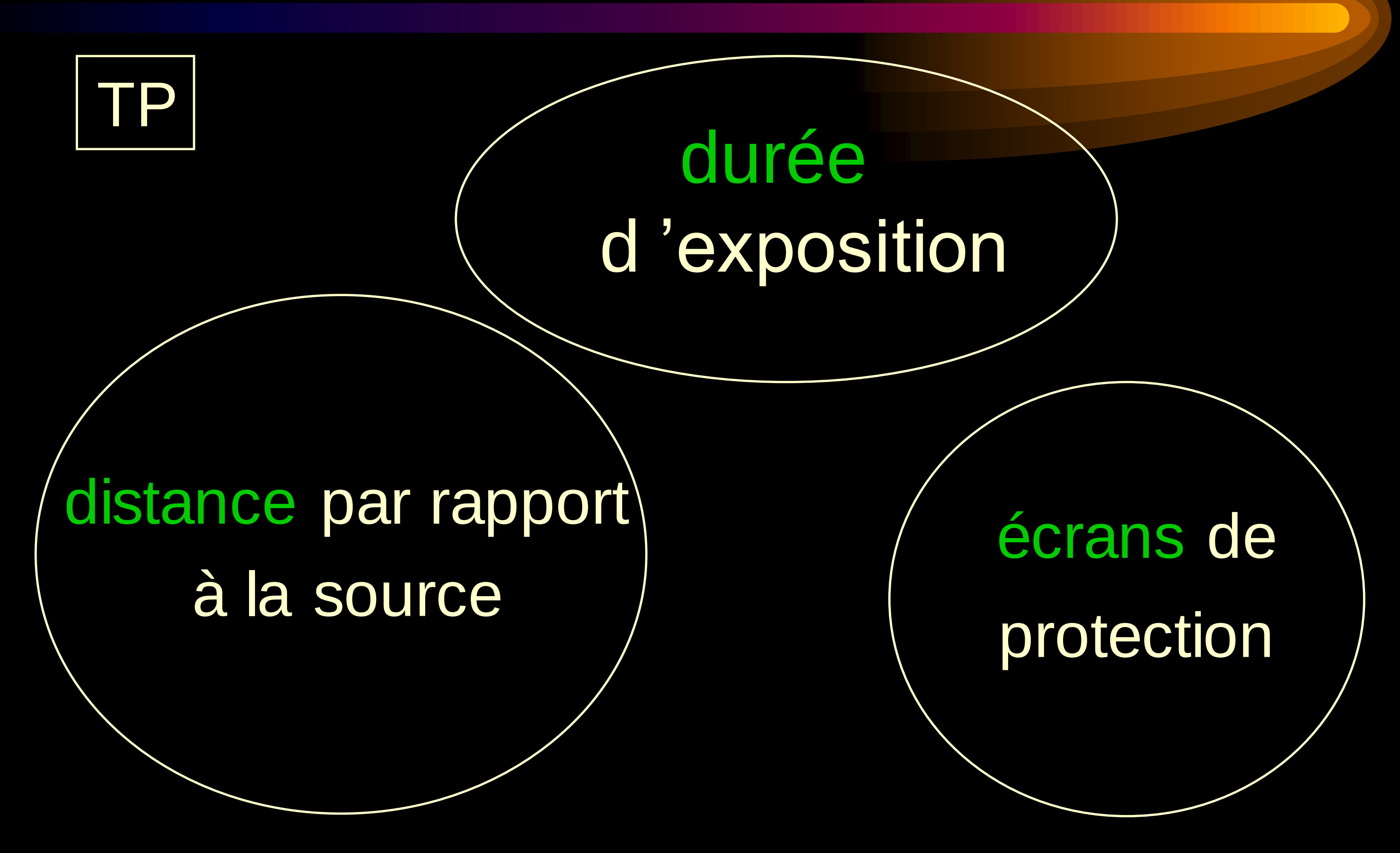
- Calcul de $\dot{E}$ à la distance *d* de la source
  - identification de la source → nature du ou des RI
  - calcul de l'activité A_t (A_o , T , âge)
  - énergie du RI
  - % d'émission

TP

- Comparer $\dot{E}$ avec $\dot{E}_L$ (réglementation)

Radioprotection

protection contre l'exposition externe



Radioprotection

exposition interne

Origine : la contamination des milieux

« présence indésirable , à un niveau significatif pour l'hygiène , de substances radioactives à la surface ou à l'intérieur d'un milieu quelconque »

Voies de pénétration

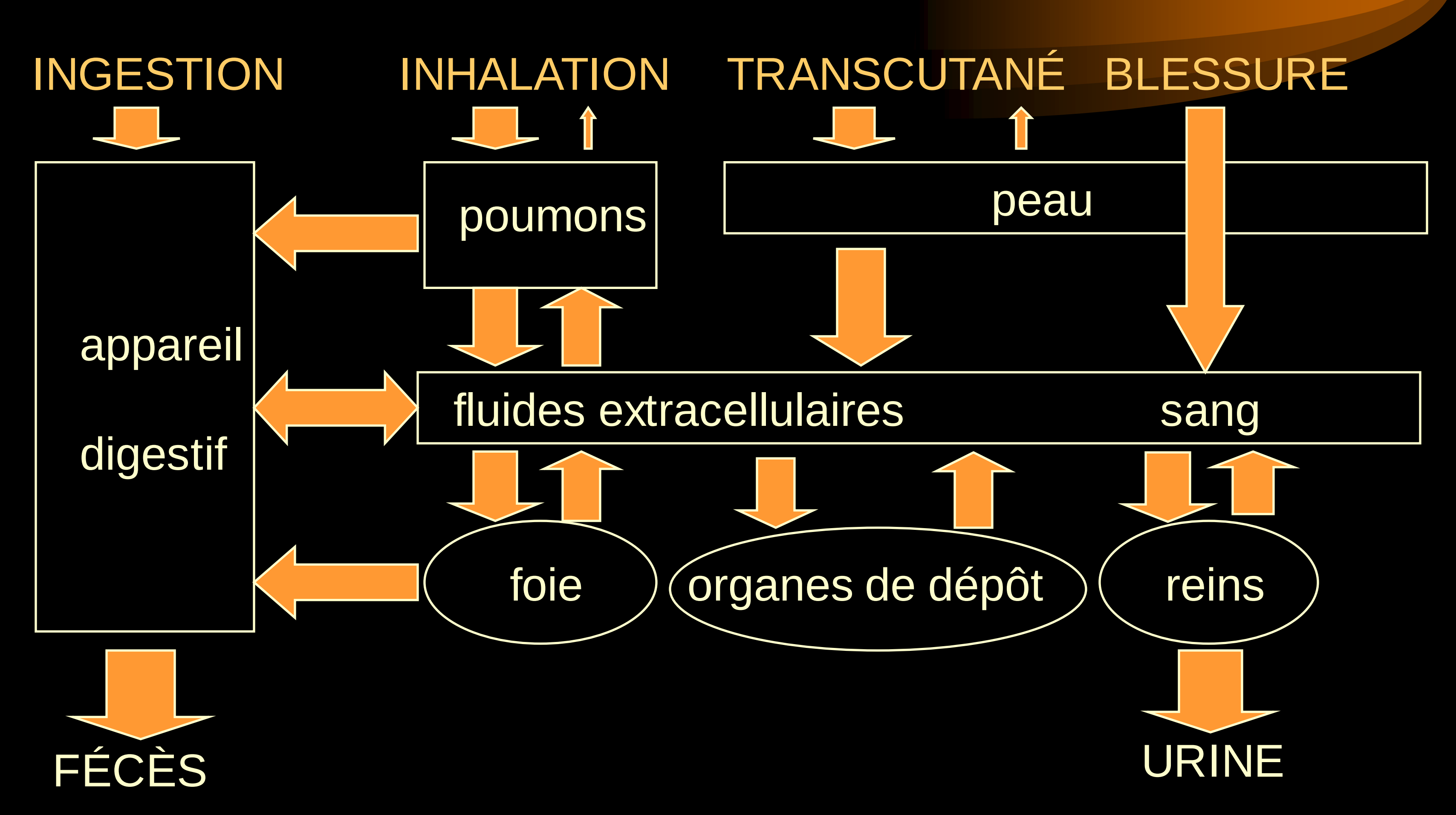
inhalation
ingestion
transcutanée
blessure

Milieux concernés

atmosphère
surfaces (paillasses)
peau - vêtements
produits de consommation

Radioprotection

incorporation et parcours d 'un radionucléide



Radioprotection

durée d'exposition interne par un radionucléide

La durée d'exposition interne
dépend :
1-de la vitesse d'élimination
de l'élément par l'organisme
2-de la constante radioactive
du radionucléide

de la *période biologique*

donc ⇕

de la *période radioactive*

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{biol}} + \frac{1}{T_{radio}}$$

$$T_{eff} = \frac{T_{biol} \cdot T_{radio}}{T_{biol} + T_{radio}}$$

Actions possibles sur T_{biol}
- saturation : iodure (thyroïde)
- entraînement : calcium (os)

Radioprotection
détection et mesure d'une exposition interne

- Spectrométrie du corps entier (émetteurs γ)
  - anthropogammamètrie par comptage externe
- Examens radiotoxicologiques (émetteurs α , β)
  - des liquides biologiques (urines)
- Mesure de l'activité des organes *in vivo* (thyroïde)
- Mesure de la radioactivité de l'air inhalé , de l'eau et des aliments ingérés
- Calcul de la dose efficace (ex : logiciel CALLIOPE)

……*évaluation a posteriori*

Radioprotection
limites de dose , exposition interne

DPUI

Dose efficace engagée Par Unité d ' Incorporation

Dose délivrée à l'organisme suite à l'incorporation d'un radionucléide

Ce coefficient prend en compte la voie d'entrée du radionucléide (inhalation ou ingestion), la durée pendant laquelle il sera présent dans l'organisme, sa forme physico-chimique , le type de population et pour le public, l ' âge.

Coefficient calculé pour chaque radionucléide (arrêté du 1/09/2003)

S'exprime en Sv/Bq

Radioprotection

évaluation du risque d'exposition interne

$$E_{interne} = \sum At_{ing} \cdot DPUI_{ing} + \sum At_{inh} \cdot DPUI_{inh}$$

$DPUI_{ingestion}$, $DPUI_{inhalation}$, (Sv / Bq); $At_{ingestion}$, $At_{inhalation}$: activités incorporées (Bq)

$E_{interne}$ travailleurs < 20 mSv/an

$E_{interne}$ public < 1 mSv/an

Radioprotection

évaluation de la dose engagée par inhalation

- Identifier le ou les radionucléides
- Déterminer la DPUI par inhalation de chacun

  Sv/Bq *(arrêté du 1/09/2003)*
- Mesurer la concentration d'activité dans l'air

  C_{At} (Bq/m^3)
- Evaluer l'activité incorporée

  At=C_{At} x nombre d'heures de travail x 1,2 *
- Calculer la dose par inhalation

  E_{inhal} = At x $DPUI_{inhal}$

* Volume d'air inspiré par h (m^3)

Radioprotection

évaluation de la dose engagée par ingestion

- Identifier le ou les radionucléides
- Déterminer la DPUI par ingestion de chacun

  Sv/Bq *(arrêté du 1/09/2003)*
- Evaluer l'activité A_t, susceptible d'être incorporée :

  analyses radiotoxicologiques, anthropogammamétrie
- Calculer la dose par ingestion:

  $E_{ingest} = A_t \times DPUI_{ingest}$

Radioprotection

protection contre l'exposition interne en milieu industriel

Protection collective

- *aménagement des locaux*

  hottes, boîtes à gants, ventilation, contrôle des effluents, gestion des déchets

- *méthodes de travail*

  plans de travail protégés, limitation de la quantité de matière radioactive manipulée

Protection individuelle

- *de la peau, des vêtements*

  blouse , gants adaptés

- *consignes de sécurité*

  (précisées dans le règlement intérieur et affichées sur les lieux de travail)

Radioprotection

protection des populations

- Origine du risque : la contamination de l'environnement
  - rejets gazeux autorisés ou accidentels
    - gaz radioactifs (xénon , krypton …)
    - produits volatils (iode , tritium …)
    - aérosols (particules fines de césium …)
  - dispersion des rejets liquides
- Voies de cheminement jusqu'à l'homme : air , eau , sol , chaînes alimentaires
  - cheminement fonction des caractéristiques du milieu récepteur :
    - climatiques ,
    - géologiques ,
    - écologiques



Radioprotection

limites exposition externe et exposition interne associées

$$E_{totale} = E_{externe} + E_{interne}$$

E_{totale} travailleurs < 20 mSv/an

E_{totale} public < 1 mSv/an

Radioprotection
détection des rayonnements ionisants

Les appareils de détection permettent d'atteindre deux objectifs fondamentaux :

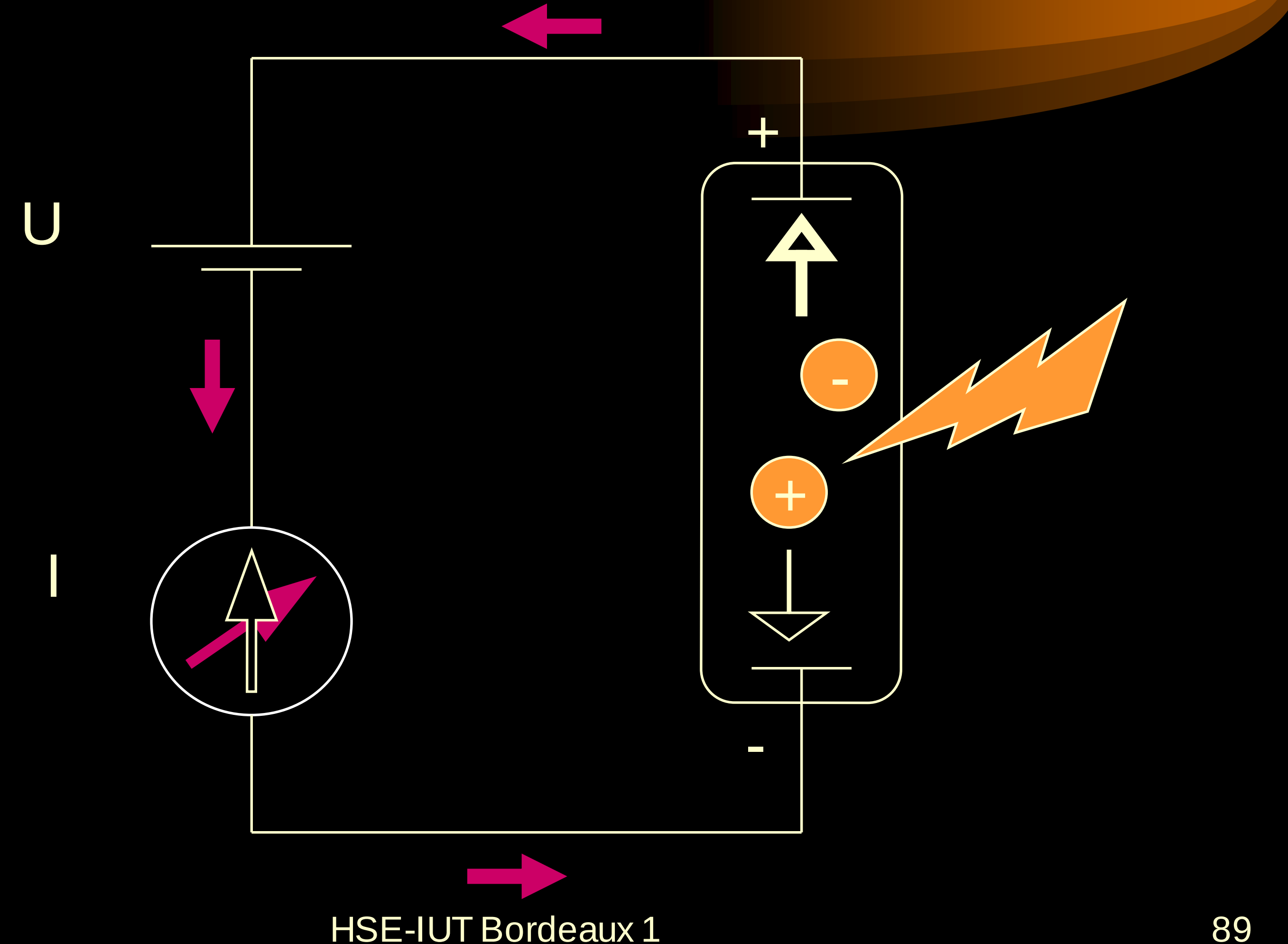
- Mesure des doses absorbées
  - mise en évidence du risque d'exposition externe
- Détection de la présence de substances radioactives
  - mise en évidence du risque d'exposition interne
    - atmosphère : mesure de l'activité volumique
    - surface : mesure de l'activité surfacique
    - milieu : mesure de l'activité massique

Radioprotection
détection des rayonnements ionisants

- Principe de détection
  - mise en évidence des effets des interactions RI-matière :
    - ionisation , détection des ions produits
    - excitation , détection des photons produits

- Classification des détecteurs suivant la nature de l 'effet
  - ionisation des gaz et des solides
  - phénomènes luminescents
  - phénomènes chimiques

détecteurs mettant en jeu l 'ionisation des gaz



Radioprotection

détection des rayonnements ionisants

détecteurs mettant en jeu l 'ionisation des gaz

- Création de paires d 'ions dans un gaz
- Collection des ions sur électrodes (fonction de la ddp)
  - zone 1 (< 100 V) - recombinaison
  - zone 2 (100 - 300 V) - ionisations primaires
  - zone 3 (300 - 1000 V) - ionisations secondaires , régime de proportionnalité
  - zone 4 (1000 -1500 V) - avalanches d 'ions , régime de Geiger-Müller
  - zone 5 (> 1500 V) - décharge permanente , détecteur inutilisable

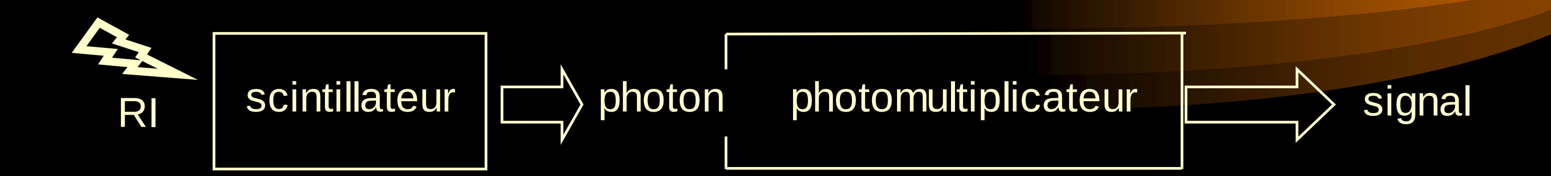
Radioprotection

détection des rayonnements ionisants
les différents détecteurs à ionisation gazeuse

- Les chambres d 'ionisation - zone 2 (X, β, γ)
  - débitmètres (contrôle des zones, mesure de contamination)
  - dosimètres intégrateurs (suivi en continu d 'une radioexposition)
- Les compteurs proportionnels – zone 3 (X, β, α)
  - permettent de faire de la spectrométrie
  - peu utilisés en radioprotection
- Les compteurs Geiger-Müller – zone 4 (X, β, γ)
  - permettent de dénombrer les particules
  - très utilisés en radioprotection (contamination de surfaces)

Radioprotection

détection des rayonnements ionisants
les détecteurs à scintillation



- Les différents types de scintillateurs
  - α : cristal de sulfure de zinc activé à l 'argent
  - X, γ : iodure de Na, K, Cs, Li, activés au thallium
  - β : composé organique (naphtalène…) dans matière plastique
- Utilisations
  - mesure de contamination de surface
  - mesure d 'exposition interne
  - contrôle de l 'air, de l 'eau, comptages sur filtres

Radioprotection

détection des rayonnements ionisants

- Détecteurs thermoluminescents (β, γ, X)
  - réseau cristallin (LiF)
  - irradiation ⟶ e^- déplacés et piégés
  - chauffage ⟶ retour des e^- ⟶ émission de lumière
    - dosimétrie des mains (bagues)
- Détecteurs photoluminescents (γ, X)
  - réseau cristallin (verre enrichi en phosphate d 'argent)
  - irradiation ⟶ e^- déplacés et piégés
  - rayonnement UV ⟶ fluorescence orangée
    - peu utilisés à l 'heure actuelle

Radioprotection
détection des rayonnements ionisants
dosimètres photographiques

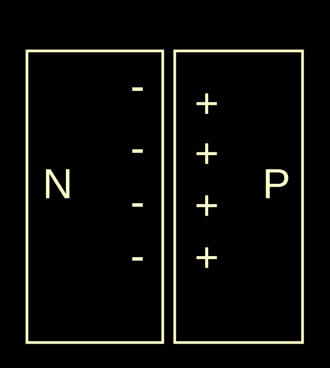
- Principe
  - impression des émulsions photographiques

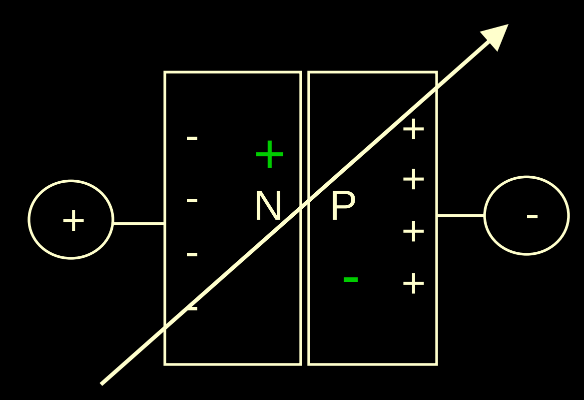
RI ⇝ Br^- ⟶ $Br + e^-$

$e^- + Ag^+$ ⟶ Ag métallique

  - développement et lecture par densitométrie
- Utilisation
  - dosimètre légal (travailleurs de catégorie A)
  - possibilité de relecture
  - archivage
  - ……………….*mais, lecture différée, évaluation à posteriori*

- Semi-conducteur N : germanium ou silicium dopé au phosphore (pentavalent, donneur d 'e$^-$)
- Semi-conducteur P : germanium ou silicium dopé au gallium (trivalent, accepteur d 'e$^-$)





- Chambre d 'ionisation solide. Energie d 'activation = 3 eV, (dans l 'air = 34 eV) ; inconvénient, la taille du volume sensible